

Umbrella Arch 공법에 의한 터널 천단부 보강시 주변 지반의 거동에 관한 연구

배규진¹⁾ · 김창용²⁾ · 문홍득³⁾ · 홍성완⁴⁾

A Study on the Ground Movement around Tunnel Reinforced by Umbrella Arch Method

Gyu-Jin Bae, Chang-Yong Kim, Hong-Deug Moon and Sung-Wan Hong

ABSTRACT Soil and rock improvement and reinforcement techniques are applied to achieve safe tunnel excavation in difficult geological conditions. The Umbrella Arch Method(UAM), one of the auxiliary techniques, is used to reduce ground permeability and improve stability of the tunnel by inserting a series of steel pipes into the ground around the crown inclined to the longitudinal axis of the tunnel. Additionally, multi-step grouting is added through the steel pipes. UAM combines the advantages of a modern forepoling system with the grouting injection method. This technique has been applied in subway, road and utility tunneling sites for the last few years in Korea. This paper presents the results of analysis of the case studies on ground movements associated with UAM used in the Seoul Subway line 5 construction site. Improvement of tunnel stability and decrease of ground settlement expected with pipe insertion are also discussed. Finally, the method to minimize ground settlements caused by NATM tunnelling are suggested.

1. 서 론

일반적으로 지반조건이 열악한 토사 및 암반 터널 공사에서는 터널의 안전굴착을 위해 여러 가지 지반개량 및 보강공법들이 적용되고 있다. 이러한 보조공법들은 시공중인 터널 주변 지반의 응력 및 변형 상태를 변화시키고 안정화를 이루기 위해서 사용되는데, 각 공법들은 지반특성이나 지질조건, 지하수 상태에 따라 서로 다른 목적으로 사용될 수 있고, 경제성 및 시공성을 고려하여 2개 이상의 공법을 혼용하여 사용하기도 한다. 이들 보조공법들은 크게 지반변위를 억제하고 지반의 강성을 증대시켜 터널의 자립도를 향상시킬 수 있는 보강공법과 지하수의 유입을 최대한 억제하여 시공효과를 극대화 할 수 있는 차수공법으로 분류되며, 또한 최근에는 지반 보강 및 차수효과를 동시에 얻을 수 있는 공법들도 많이 개발되어 적용되고 있다. 그러나 이러한 병용 효과를 얻을 수 있는 보조공법을 적용한 사례가 국내·외적으로 많이 보고되고 있지만, 이를 적용한 여러 현장에서 구조물의 손상사례가 계속 보고되고 있어 국내 시

공현장의 경우 보다 합리적인 공법의 선정기준 강구나 효율적인 보조공법의 개발 및 적용이 요구되고 있다.

Pelizza와 Pelia^{11,15,17)}의 보고에 따르면 이탈리아의 경우, 70년대 중반부터 굴착전에 터널 천단부를 따라 천공 소구경 강관들을 일정간격으로 삽입한 후 강관내의 구멍을 통해 그라우팅을 수행하여 터널의 보강 및 차수효과를 동시에 얻을 수 있는 UAM 공법을 개발하여 실무에 활용할 수 있게 하였고, 정밀 천공장비나 주입약재 등을 개발하여 본 공법의 효용성을 극대화하는 방향으로 기술개발을 추진해 오고 있다. 일본의 경우도 山本 愈와 Pagliacci^{8,10)}의 아카이시해협의 마이고 도로터널에 관한 연구에 따르면, 이 터널은 직경이 16~17.7 m, 토파가 13~20 m인 대단면 저심도 터널이며, 연약사력층 지반을 관통하는 난공사 구간임에도 불구하고 Umbrella Arch 공법을 활용, 성공적으로 굴착공사를

- 1) 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구실 실장
- 2) 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구실 연구원
- 3) 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구실 선임연구원
- 4) 정회원, 한국건설기술연구원 부원장

수행한 사례를 보고하고 있어서 각종 보조공법중에서도 UAM 공법이 터널 안정에 상당히 효과적인 공법임을 증명한 바 있다. 또한 중국의 경우도 석회암 지역을 관통하는 Nanling 터널 공사시 붕락사고가 자주 발생하여 이의 해결 일환으로 본 공법을 적용하여 좋은 결과를 얻은 것으로 보고한 바 있다.

국내의 경우는 1990년대초 제 2기 지하철 건설공사 시 일부구간에서 UAM 공법이 적용된 바 있고 일부 도로터널 및 지중선 터널현장에서도 사용되고 있다.^{2,5,6,9)} UAM 공법을 적용한 결과, 공사비 및 공기 측면에서는 타공법에 비해 유리한 것으로 알려져 있으나, 기술적인 측면에서의 정량적인 효과 즉, 지반차수 및 보강효과와 터널 안정효과 등에 대해서는 관련 연구의 미흡으로 현재까지 명확하게 규명되고 있지 않은 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 UAM 공법의 터널 보강효과와 주변지반의 거동 억제효과를 규명하기 위해서 본 공법이 적용된 서울 지하철 5-A 공구에 대표 계측구간을 설정하여 여러 지반조사 방법에 의한 본 공법의 시공효과 확인을 수행하였다. 그리고 현장 측정을 통하여 본 공법 적용시 지반변위의 형태 및 막장 전방의 이완 영

역, 변위량 등을 분석하였다. 또한 서울 지하철 일부 구간 및 부산, 대구지하철 일부 구간에서 수집한 계측자료를 토대로 본 공법이 적용되지 않은 구간과 적용된 구간과의 변위거동을 비교·분석하여 본 공법의 지반보강효과에 대한 정량적 분석을 실시하였다.

2. 현장조건 및 실측계획

2.1 지반조건

본 연구에서는 본 공법이 사용된 국내 여러 지하철 터널 현장 중에서 본 공법의 지반 보강 및 차수효과를 명확히 규명할 수 있는 열악한 지반조건인 터널 시공현장을 선택하였다. 이를 위해 지하수위가 상대적으로 높고, 터널이 통과하는 상부에 충전층이 두껍게 발달한 하상퇴적층 구간에 막장자립 및 터널 안정성의 확보를 위해 UAM 공법을 적용한 서울지하철 5-A 공구를 대표 계측구간으로 선정하였다.

본 공법의 시공현장은 선캄브리아기의 편마암류와 이를 부정합으로 덮고 있는 제 4기 충전층으로 구성되어 있다. 여기서 호상흑운모 편마암(banded biotite

Table I. Ground properties and geological description.^{1,3)}

	층두께(m)	E(t/m ²)	γ(t/m ³)	C(t/m ²)	φ(°)	지층상태
매립토층	7.60	1,500	1.80	1.0	30.0	주로 모래, 자갈 등으로 구성됨. 부분적으로 유기물질 및 폐기물이 소량 함유되어 있음. 표준관입 시험결과 대체로 매립층은 다짐을 받지 않은 느슨 내지 보통 조밀한 상대밀도를 보임.
충적층	13.80	-	2.10	0.0	35.0	상부로부터 연약내지 매우 견고한 실트질 점토 및 모래질 실트, 느슨 내지 매우 조밀한 자갈섞인 모래층 그리고 기저부에 느슨 내지 매우 조밀한 모래질 자갈층이 충전층을 형성. 투수시험결과 점토층은 불투수성을, 모래층은 5.35×10 ⁻⁶ cm/sec, 모래자갈층은 5.35×10 ⁻⁴ cm/sec 정도의 투수계수값을 나타냄.
풍화토층	6.00	8,000	2.00	30.0	40.0	관입저항치 50회/15 cm를 기준으로 풍화도와 풍화암으로 구분. 풍화작용에 의한 암석 조각은 완전 분해되어 토질화 되는 과정. 모암의 원구조는 육안으로 식별 가능하며 원위치에서 매우 굳고 치밀한 상태임. 투수계수는 3×10 ⁻⁶ cm/sec 정도임.
연암층	2.00	51,000	2.20	40.0	43.0	
연암층	8.00	211,000	2.45	50.0	45.0	상부기반암층으로 지표하 25 m~시추종료 심도까지 분포하고 있으며 불연속적인 파쇄대나 절리를 따라서 심한 풍화작용을 받아 암체가 암괴상으로 분리를 시작하는 상태를 보이며 심도가 증가할수록 경암층으로 변화됨.

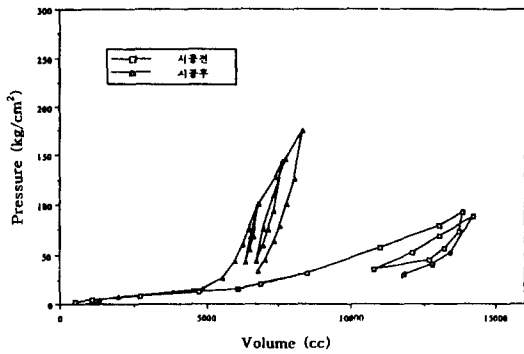


Fig. 1. Bore hole test results showing the effect of grouting

gneiss)으로 구성되어 있는 편마암류는 경기편마암류 복합체의 일부로서 여러 차례에 걸친 변성작용으로 교란되어 암상 및 엽리구조의 변화가 심하며 곳곳에 소량의 규암, 석회규산암과 같은 퇴적 기원물들이 협재되어 있다. 또한 시추조사 결과 조사지역 부근 지층은 매립토, 두꺼운 충적층, 풍화대층, 연암층, 경암층 등으로 구분할 수 있고, 지하수위가 지표로부터 2~3 m로 비교적 높은 구간이며(Fig. 2 참조), 현장시험을 통해 얻은 본 구간의 지반물성치 및 지층상태는 Table 1과 같다.^{1,3)}

또한 본 공법 시공전과 시공후 지반개량 효과를 파악

하기 위해 풍화암층 구간에 위치한 터널막장 천단부에서 수평 천공후 공내 재하시험을 수행하였다. 사용한 시험 방법은 등분포 하중법을 이용하였다. 시험결과 UAM 공법 시공전 즉, 시공대상 원지반의 탄성계수는 $E=5.1 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$ 이었으며, 본 공법 시공후 즉 그라우팅에 의한 지반 개량후의 탄성계수 $E=2.0 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ 으로, 지반보강 후의 탄성계수가 약 4배 정도 증가하였는데 이는 터널 허부 연암의 탄성계수 $E=2.11 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ 과 유사한 값이다.³⁾ 즉 시멘트 밀크 주입이 주 주입재로 활용되는 본 공법의 경우, 지반의 개량효과는 비교적 크게 나타난다고 판단된다(Table 1, Fig. 1 참조).

2.2 UAM 시공방법

본 구간은 대단면 복선 터널구간으로 터널단면은 지름이 약 10 m이고, 터널상부 토피고는 약 25 m로 충적층과 풍화암층이 위치하고 있으며 그 하부에 연암층이 발달해 있어 PD-3 패턴³⁾에 준한 시공이 진행되었다(Fig. 2)

터널 굴진은 열악한 현장 지질조건을 고려하여 지반변위를 최대 줄일 수 있도록 상·하반 분할 굴착 방법을 채택하였으며, 1회 굴진장은 약 0.8 m 이다. 상반과 하반의 분할 굴착방법은 작업공간을 확보하기 위한 10 m 간격만을 유지하면서 굴착이 진행되도록 계획되었다. 또한 막장 전면의 지층은 매우 연약한 풍화암이 주를 이루고

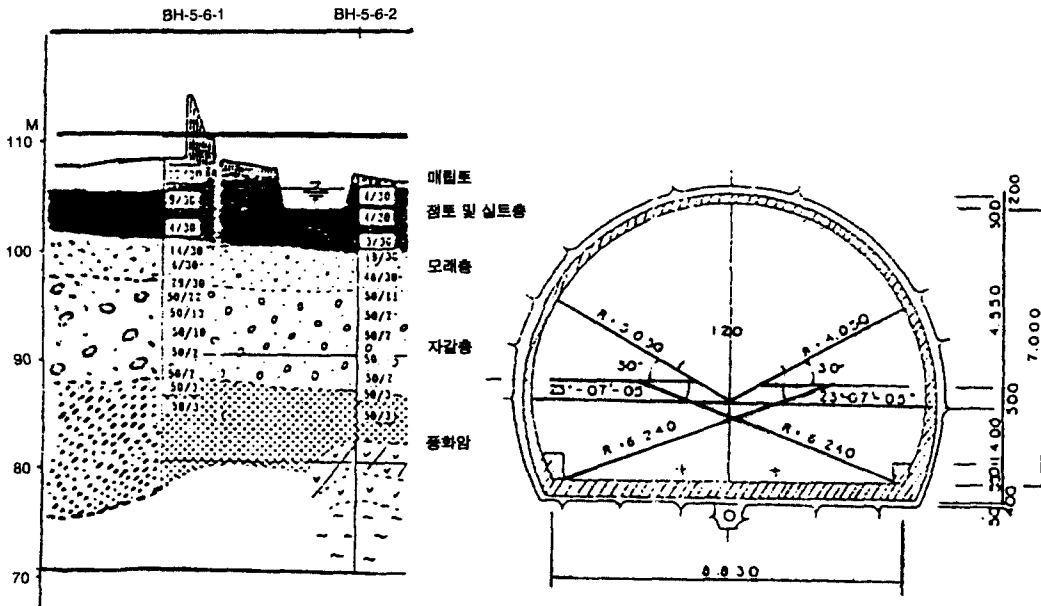


Fig. 2. Geological profile and tunnel section view

있고, 지하수위가 높아서 차수 및 지반보강 목적으로 터널 아치부 120° 각도 내에 길이가 18 m인 29개의 강관을 일정간격으로 설치한 후 강관내에서 다단계 방법으로 그라우팅을 시행하는 UAM 공법을 적용하였다.

본 현장에서 실시한 UAM 공법은 먼저 시공효율을 높이기 위해 터널 단면을 40~50 cm 정도 확폭하여 크로라드릴과 KANO 드릴에 의해 직경 100 mm, 길이 18 m의 구멍을 4~10° 상향경사로 천공한 다음 일반구조 강관(직경 50 mm, 0.5 m 간격으로 직경 5 mm의 분사공 설치)을 삽입하고 코킹(corking)과 실링(sealing)작업 후 그라우트재 주입이 이루어졌다.

2.3 현장 계측계획 및 방법

UAM 공법의 보강효과를 파악하기 위해서 지표침하,

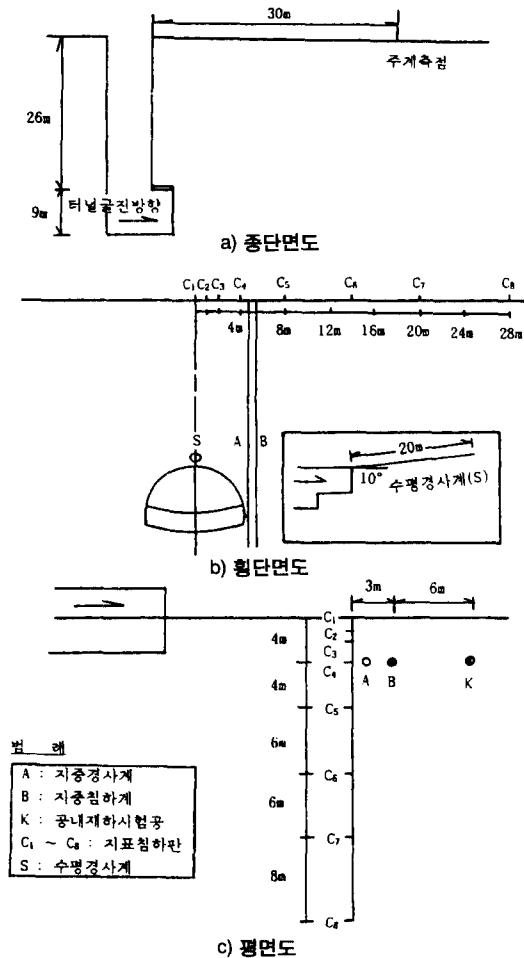


Fig. 3. The locations of field instruments

터널천단침하 및 내공변위 등과 같은 지반거동이 현장계측을 통하여 측정되었다. 그러나 현장 상황의 제약으로 지표침하의 경우는 Fig. 3(b)와 같이 터널 우측 반단면에 대해서 횡방향 8개의 측점에 대해 계측이 이루어졌고, 지중침하계 및 지중경사계의 경우도 Fig. 3(c)에서와 같이 터널 우측에 각각 1측점씩 만이 설치·측정되었다.³⁾

한편, 터널 내부계측은 침하핀(pin)을 이용한 천단침하 및 내공변위 측정외에 터널 굴진전 터널의 막장상부에 수평 경사계를 터널 굴진방향으로 설치, 천단침하량을 정밀 측정하도록 하였다. 수평경사계는 Fig. 3(b)와 같이 수평으로 설치하는 작업이 어려워 약 10° 상향 경사, 20 m 길이로 설치됨으로써 6°~7° 경사 각도로 삽입된 강관 바로 직상부에 위치하게 하였다. 사용된 수평경사계는 SINCO사의 Horizontal Digitilt, 모델 50329로서 borehole 설치용이며 지반침하 및 용기 등을 주로 측정할 수 있는 장비로서 작동가능 각도는 53°이며, 30 m 당 2.5 mm의 정확도를 갖고 있다.^{1,3)}

본 터널 현장에서는 터널 내부 작업공간 문제로 경사계를 10° 경사로 설치하였기 때문에 경사계 끝단이 3.5 m 정도 터널 천단상부에 위치하나 터널 막장의 거동, 영향 각도를 고려하여 실제 거동 측정은 경사계 15 m 정도까지만 이루어져 그 부위에서의 이격높이가 약 2 m에 불과하므로 본 연구에서는 경사계로부터 측정된 값들을 천단침하값으로 사용하였다.

3. 현장 계측 결과분석

3.1 종방향 지표침하

최근까지의 연구 결과에 따르면²⁾ 종방향 지표침하는 오차함수(error function), 누적 가우스함수(cumulative gaussian function) 및 지수함수로서 해석이 가능한 것으로 알려져 있으며, 일반적으로 터널 막장이 계측점을 통과할 때의 침하비율을 30~50%로 보는 경우가 대부분

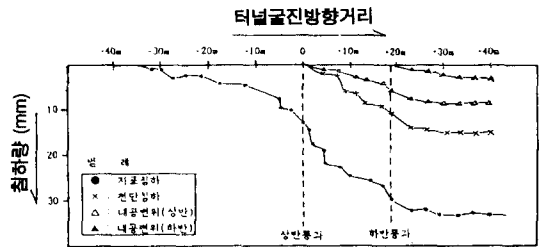


Fig. 4. Measured longitudinal surface, crown settlement

이다.

Fig. 4는 터널 중심선 상부의 지표침하와 터널 내부의 침하판을 이용하여 측정한 터널 천단침하 및 내공변위값을 도시한 것이다.

그림에서 보는 바와 같이 UAM 공법을 시행한 경우도 종방향 최대지표침하 곡선이 누적 가우스 함수 또는 일반 지수함수곡선 형태²⁾로 나타나고 있고 계측점 통과시의 발생 침하량이 최종 지표침하량의 38%로 도시되고 있어 앞서 제시한 일반터널 현장의 침하 범주내에 드는 것으로 현장의 경향과 큰 차이점을 보이지 않고 있다. 또한 지표침하량의 최대값은 33 mm로, 인접구간의 침하계측 결과에 비해 큰 값이나 실측현장의 지질조건이 매우 열악한 점을 감안하면 UAM 공법이 시행되지 않았을 경우 더 큰 침하가 발생하였을 것으로 예상된다.

천단침하의 경우는 일반적으로 지표침하보다 큰 값을 갖게 되나 지표침하량의 1/2 정도로 매우작은 값을 보이고 있는데, 이는 터널 굴진이 3 m 정도 진행된 상태에서 침하 pin이 설치된 후 초기치가 읽혀졌기 때문에 실제 값보다 작게 나타났던 것으로 판단된다. 내공변위값도 상반부의 경우 천단침하의 1/2 정도로 나타나고 있으며, 하반 굴착후 8~10 m 지점에서부터 수렴하는 경향을 보였다.

3.2 횡방향 지표침하

횡방향 지표침하 트라프의 형태는 통상 가우스 정규 분포 곡선을 따르며, 지반의 종류에 관계없이 일반 토사터널에 적용될 수 있다.²⁾ Fig. 5는 횡방향 지표침하 형태와 터널 우측부에 설치된 지중 침하계의 침하형상을

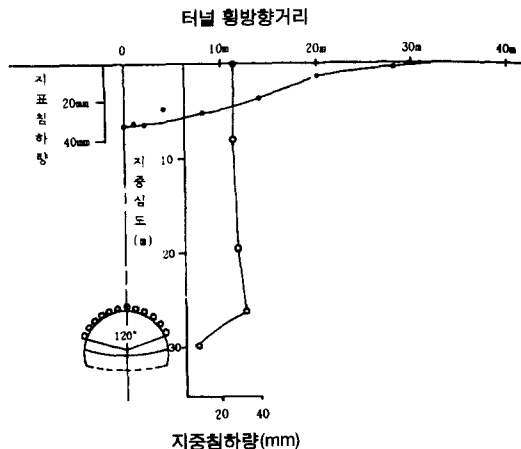


Fig. 5. Measured relative horizontal surface settlement

을 도시한 것이다. 횡방향 지표침하의 경우, 그림에서와 같이 curve fitting을 하면 가우스 곡선 형태²⁾로 도시되고 있으며, 가우스 곡선상의 변곡점($i=0.61 S_{max}$, 여기서 S_{max} : 최대지표 침하량)은 터널 중심선에서 약 15 m 떨어진 지점($i/R=3.4$, 여기서 R은 터널 반경입)에 나타나고 있어 침하영역이 상당히 넓게 나타나고 있음을 알 수 있다.³⁾ 이는 강관의 보강효과에 의한 결과라고 볼 수 있으며, 일반적으로 터널 심도가 깊어지면 침하 폭도 역시 넓어지는 경향성과도 유사한 현상일 것으로 판단된다.¹¹⁾

한편, 터널 측벽부에 설치된 지중침하계로부터 측정된 지중침하의 경우 지중심도에 따른 침하량 증가는 크지 않으나 강관시공이 이루어지지 않은 터널 어깨부에서 가장 큰 침하값을 보이고 있어 수집계측 자료를 분석한 경우³⁾와도 유사한 결과를 나타내고 있다.

3.3 터널 거동

Fig. 6은 터널 막장(계측기 설치지점)에서 터널 굴진 방향으로 설치한 수평경사계로부터 측정된 터널 천단침하량을 터널 상반 굴진거리별로 도시한 것이다. 상반 굴착시 최대 천단침하량은 약 36 mm이며, 터널 막장 전방 2~4 m 지점에서부터 지반거동이 시작되고 있음을 알 수 있다. 또한 하반 굴착시 발생한 천단 침하량이 약 9 mm 이므로 전체 천단 침하값이 약 45 mm이며, 이는 Fig. 4에서 도시한 천단침하량(터널막장 3 m 후방에서의 레벨측정치) 16 mm에 비해 약 2.8배 큰 값이다. 결과적으로 본 현장조건하에서 터널 시공을 수행하는 경우 터널 막장 후방에서 레벨로 천단침하를 측정하면 아무리 초기에 침하핀 설치와 측정이 이루어진다 해도 실제 지반거동의 1/3정도 밖에 측정되지 않는다고 판단된다.

또한 터널 굴진거리에 따른 천단 침하량의 발생비율을 조사하기 위하여 Fig. 7과 같이 천단 침하자료를 재도시 하였다. 그림에서와 같이 천단침하는 막장 전방 0.75 H (여기서 H는 상반부 터널 높이)지점에서부터 시작하며, 막장이 초기침하 측정지점을 통과할 때 전체 침하량의 약 28%가 발생하고 있다. 그리고 3 H 정도 터널 굴진이 이루어지면 그 지점에서의 천단침하 값은 수렴하는 형태로 나타나고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8은 UAM 공법 설계시 주요 설계요소가 되는 터널 막장의 거동영역을 파악하기 위하여 수평경사계로부터 구한 천단침하 곡선과 시험구간에서 발생한 두

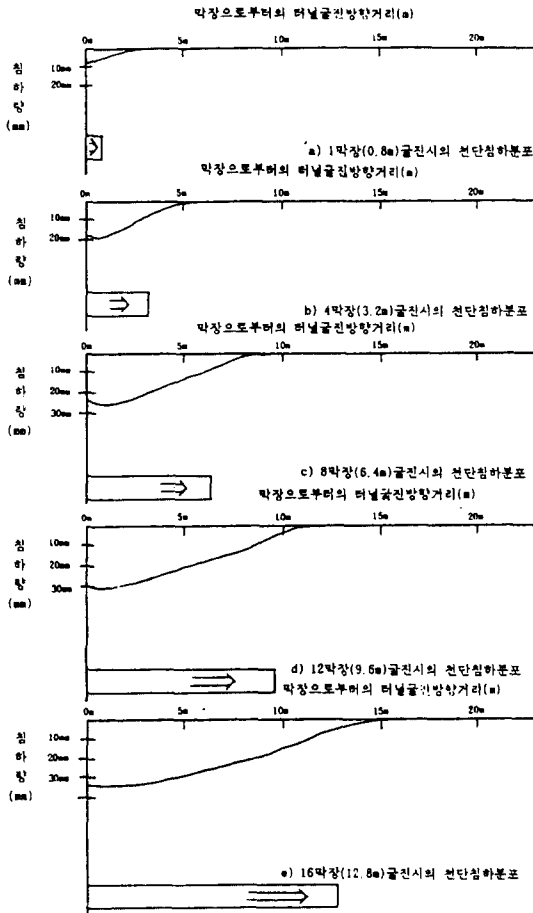


Fig. 6. Relative vertical surface settlement measured in tunnel

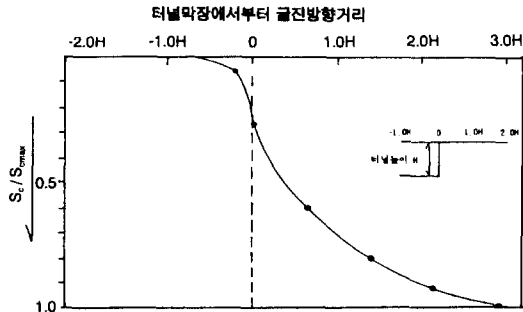


Fig. 7. Measured relative crown settlement

건의 소규모 막장 붕락사고시 얻은 막장 붕괴각도, 그리고 암반의 내부 마찰각 Φ 값으로부터 추정된 예상거동 영역 등이 함께 도시된 그림이다.

그림에서 보는 바와 같이 UAM 공법을 시행하는 경우 침하 실측시 지반거동 각도가 31°~36°이고 암반물

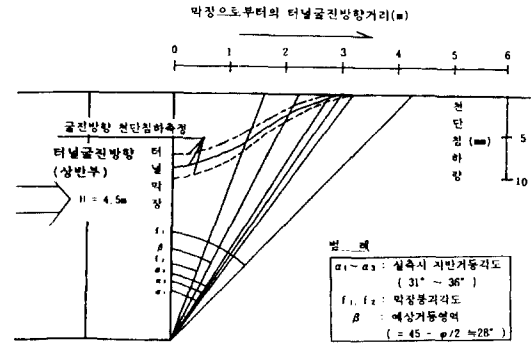


Fig. 8. Displacement and collapse pattern from excavated tunnel face

성으로부터 추정된 예상 거동각도는 약 28°로 나타나 큰 차이를 보이지 않으나 국부적으로 발생한 막장 붕괴의 각도는 23°, 43°로서 막장 거동각도와는 상당히 다른 양상을 보이고 있다. 막장붕괴는 막장 천정부근에서 소규모 썩기형태로 암괴가 떨어진 경우와 막장 저면부에서 약 43°의 매우 완만한 각도로 강관 설치부근까지 붕괴가 발생한 경우등으로 대별할 수 있는데 이들은 모두 단층대를 따라 발생된 것이어서 풍화도가 심한 현장에서 강관의 겹침길이를 결정할 때는 막장의 일반 거동영역 보다는 단층대나 주절리의 가장 취약한 상태를 고려(45° 각도)하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.³⁾

4. 수집된 계측자료 분석

4.1 현장조건

본 구간의 지질조건은 Fig. 9와 같이 편마암이 풍화하여 형성된 지층으로 상부에 실트층이 얇게 분포되고 있으며 그 아래로 풍화토와 풍화암이 발달한 구간이다. 터널의 토피고는 약 12 m 정도이며 터널 통과부는 풍화암층으로 구성되어 있고, 터널 천단부 4~5 m 상부에는 풍화토층이 위치하고 있다. 그러나 일부 구간에서는 터널 S.L 부분까지 풍화토층이 위치한 곳도 있어 PD-3 패턴³⁾에 준한 시공이 이루어진 구간이다. 직경 10m인 터널의 굴착방법은 다만 bench cut 방법이 적용되었고, 또한 굴진장 0.8 m 간격으로 강지보를 설치하고, 길이 4 m의 록볼트 보강을 하면서 시공이 진행되었다. 그러나 터널 좌·우측 상부에서 소성영역이 발생하고 지표침하 및 천단침하가 과다하게 발생하므로 막장의 안정과 지표면 침하의 억제를 위해 UAM 공법이 적용된 구간이다.

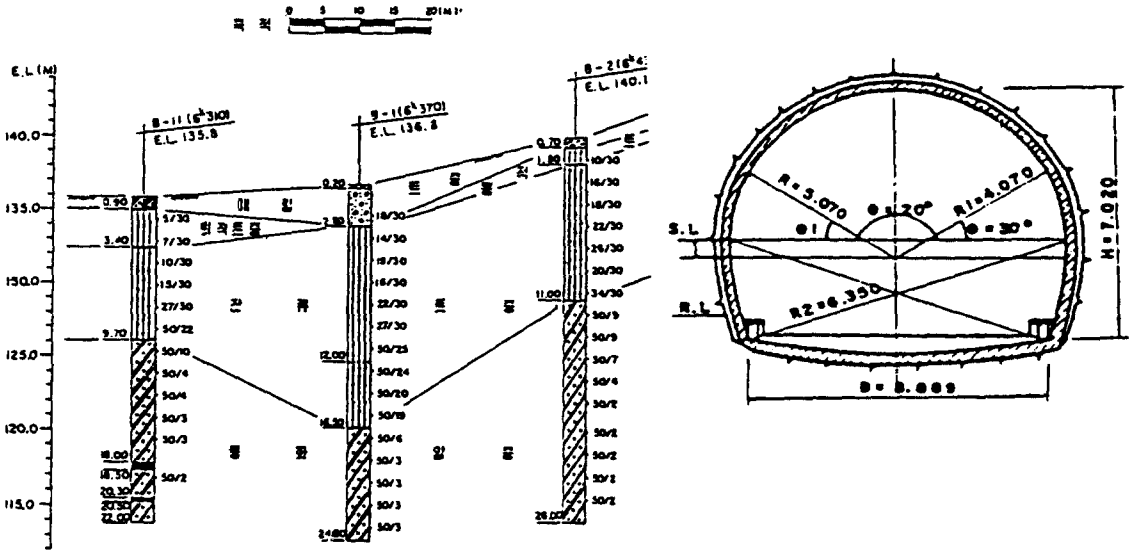


Fig. 9. Geological profile and tunnel cross section view of Seoul subway 5-B

계측이 수행된 본 구간은 터널 직경(10 m)에 비해 토피(12~13 m)가 매우 얇고 풍화도가 터널 천단부위까지 폭넓게 발달하여 터널 상반부의 안정문제가 심각히 대두되었던 0k 280 m 지점에서 0k 440 m 지점까지의 터널 굴착구간과 터널 상부의 토피(15~28 m)가 상대적으로 두껍고 풍화암 및 연암층이 터널 천단부에서 4~12 m 이상의 상부까지 발달되어 터널 굴착이 암반에서 이루어진 0k 440 m~0k 660 m 지점 까지의 구간 등으로 구분할 수 있다.

여기서 풍화도에서 터널 굴착이 이루어진 0k 280 m~0k 440 m 터널 구간의 경우, 초기 굴착은 전술한 바와 같이 터널 천단부의 사전 보강없이 단순 굴착으로 이루어졌기 때문에 상당히 큰 지표침하와 천단침하가 발생하였고 이로 인한 터널의 막장안정과 함께 지표면에서의 건축물의 손상에 대한 의문이 커짐에 따라 0k 300 m 지점부터는 UAM 공법이 적용되었다. 그러나 토피가 증가하고 암선이 터널 천단부 이상으로 올라가는 0k 450 m 지점 부터는 유입지하수량이 극소량이고 터널막장의 안정을 기대할 수 있어 UAM 공법을 사용하지 않고 당초처럼 단순 굴착 및 지보방법이 적용되었다.

4.2 터널천단 침하 및 내공변위

Fig. 10은 지표침하가 측정된 지점에서의 터널 천단 침하량의 분포를 도시한 것이다. 풍화도에서 터널 굴착이 수행된 0k 283 m, 320 m, 360 m의 경우 UAM 공

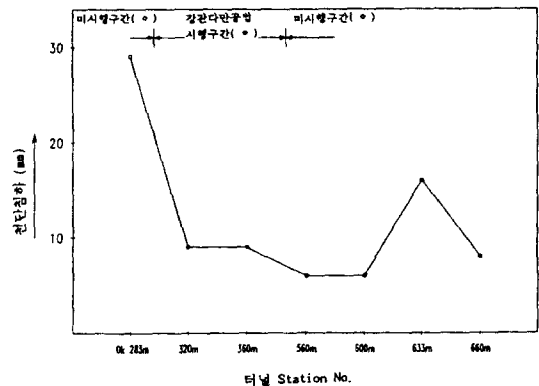


Fig. 10. Distribution of crown settlement

법을 적용했을 때의 천단 침하량이 9 mm 정도로서, 본 공법을 적용하지 않은 지점에 비해 천단침하가 약 1/3 정도 경감된 값으로 나타나고 있으며, 또한 이 값은 풍화암 구간에서 본 공법 적용없이 굴착작업이 이루어진 지점들의 평균 천단침하량 (9 mm)과 같게 나타나고 있다.

따라서 이러한 경향을 볼 때 천단침하량의 분포는 지표침하량의 분포형태(Fig. 12)와 비교적 유사하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 그러나 양적인 면에 있어서는 지표침하량보다 천단침하량의 경감효과가 보다 크게 나타나고 있는데 이는 UAM 공법이 주로 터널 어깨부위의 천단부를 보강(강관이 터널굴착 저면 중심부에서 120° 각도로 시공됨)하게 되므로 천단부 구속효과는 뛰

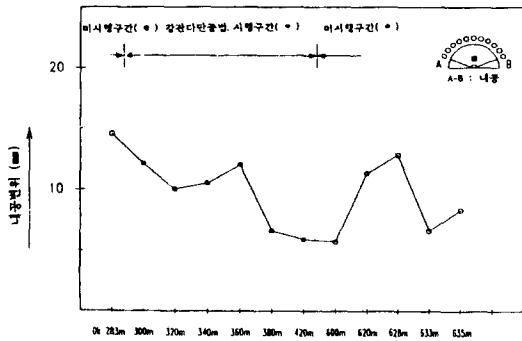


Fig. 11. Distribution of tunnel convergence

어나나 터널 측벽부와 하반부에서의 지반거동은 허용하게 되며, 또한 이 부위를 통해 지하수의 유입을 허용하기 때문에 사료된다.

Fig. 11은 터널 내부 A, B 두 지점의 내공변위량을 터널 지점별로 도시한 것이다. 강관 보강형 다단 그라우팅을 시행했을 때의 내공변위량의 평균치는 약 9 mm로서, 본 공법을 적용하지 않은 지점에 비해 내공변위가 약 30% 정도 경감된 값으로 나타나고 있으며, 또한 이 값은 비교적 굴착조건이 좋은 상태에서 본 공법 적용없이 굴착된 0k 600 m~0k 635 m 지점에서의 평균 내공변위량(8.8 mm)과 거의 같게 나타나고 있어 천단침하 발생형태와 비슷한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다.

그러나 본 공법 적용시의 내공변위량 경감효과는 진술한 바와 같이 침하량 감소 효과에 비해 다소 낮은 30% 정도로 나타나고 있어 본 공법 적용시의 내공변위 경감효과는 침하 경감효과에 비해 상대적으로 작음을 알 수 있다. 이는 Fig. 11의 내부에 도시된 터널형상에서와 같이 내공변위측정은 강관이 설치되어 있지 않은 터널 하단부에서 이루어지므로 120° 각도로 터널 천단 주변부만 강관을 설치하는 현재 시공 조건하에서는 침하 경감효과 만큼 내공변위 감소효과를 크게 얻기가 어렵다고 판단된다.

4.3 지표침하

Fig. 12는 계측이 수행된 본 구간에서의 터널 지점별 최대 지표침하량을 도시한 그림이다. 비교적 기하학적 조건($Z_0/D=1.7$, Z_0 : 터널 토피고)과 지반조건(풍화토 구간)이 유사한 0k 283 m~0k 300 m 지점에서의 지표침하량을 1차적으로 고려해 볼 때 UAM 공법을 적용한 경우가 평균 28 mm의 지표침하량을 보이고 있어 보조

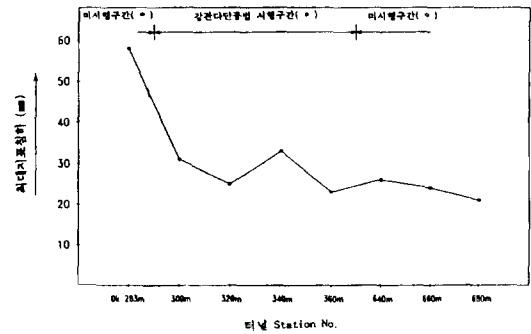


Fig. 12. Distribution of surface settlement

공법을 적용치 않은 지점에 비해 48%의 지표침하 경감효과를 얻은 것으로 나타났다. 또한 지반 조건이 상대적으로 양호하여 본 공법을 적용치않은 구간의 경우는 지표침하량이 평균 24 mm 정도로서, 풍화토 구간에서 UAM 공법을 적용한 경우와 비슷한 침하값을 나타내고 있다.

본 구간의 경우 현장계측 자료의 부족과 특정한 현장 조건을 갖는 다른 제약 때문에 UAM 공법 적용에 따른 지표침하 경감효과를 일반적으로 제시하기는 어려우나 $Z_0/D=1.7$ 정도로 표피가 얇은 토사층 관통터널의 경우 약 1/2 정도의 지표침하 경감효과가 있을 것으로 추정된다.

Fig. 13은 UAM 공법이 적용된 0k 310 m 지점에서의 지표 및 지중침하분포를 알아 보기 위하여 터널 주변에 설치된 지중침하계(Extensometer)와 지표침하핀

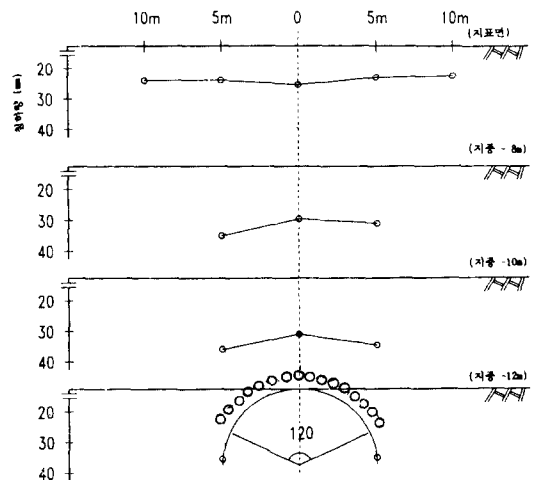


Fig. 13. Distribution of surface and ground settlement (0k 340 point)

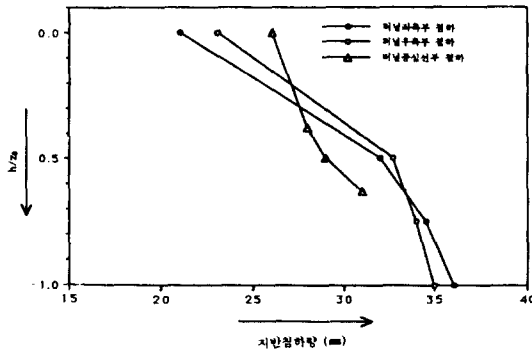


Fig. 14. Relation between ground settlement and h/Z_0 .

의 측정치를 도시한 것이다. 그림으로부터 UAM 공법을 적용한 경우 지반의 최대침하하는 강관의 지반 구속효과로 인해 터널 천단부보다 강관시공이 이루어지지 않은 터널 측벽부 직상부에서 나타나고 있다는 사실과 터널 중심선이 지나는 지중에서의 침하보다 이러한 터널 측벽부 상단 지중에서의 침하가 다소 크게 발생하고 있음을 알 수 있다. 그러나 이러한 현상은 상부로 올라갈수록 줄어들어 지표면에서는 일반 터널 시공시에서와 같이 터널 중심선부에서 최대침하값이 나타나고 있다.

Fig. 14는 이러한 지반침하경향을 자세히 파악하기 위하여 터널 중심선상에 설치된 지중침하계와 터널 S.L. 라인부에서 1 m 정도 떨어진 터널 좌·우측에 설치된 지중침하계에서 측정된 지반침하량을 지중 심도비, h/Z_0 (여기서 h 는 임의의 지중점 P에서 지표까지의 연직깊이를, Z_0 는 터널 중심에서 지표까지의 연직깊이를 나타냄)에 따라 재도시한 것이다. $h/Z_0=0.3$ 인 지점부근에서부터 지표면으로 갈수록 터널 중심선상의 지중침하가 주변 지반의 침하보다 다소 크게 나타나는 이른바 보조공법을 적용하지 않은 일반 터널 시공법상에 발생하는 침하패턴을 보여주고 있다.

최대 지반침하를 발생시키는 터널 좌우 측벽부근의 경우, 측벽부에서부터 h/Z_0 가 0.5인 지점까지는 지중심도에 따른 지반 침하량이 느리게 감소하나 지표면으로 갈수록 급격한 침하감소가 일어나 터널 측면부 상단의 지중침하는 터널 중심선상의 지중침하에 비해 작게 나타나고 있다.

Fig. 13과 Fig. 14로부터 터널 굴착저면 중심부에서 120° 각도로 강관을 시공하고 있는 현 UAM 공법을 누수가 많은 현장에 적용할 경우, 지반손실(ground loss)을 크게 발생시키는 주요 부위는 터널 천단부보다 강관

이 설치되지 않은 터널 측벽부임을 알 수 있으며, 이러한 원인으로 인해 터널 굴착지점에서부터 $h/Z_0=0.3$ (또는 $h/1=0.6$)인 지점까지는 터널 중심선상의 지중침하보다도 터널 좌우측변의 직상부에서의 지중침하가 터널과 인접한 지중구조물의 안전에 더 큰 영향을 미친다는 점을 알 수 있다.

4.4 결과분석

Fig. 15는 본 UAM 공법을 적용한 경우, 지표면에서 나타나는 횡방향 지표침하 트라프 형태를 종합적으로 분석하기 위하여 본 계측 구간의 침하 데이터와 부산 및 대구지하철 일부구간의 침하데이터들을 Peck의 지반침하 해석도표와 함께 도시한 것이다.^{2,3,4} 그림에서와 같이 본 공법을 적용한 현장(X)의 경우 침하트라프의 폭이 일반 계측 데이터에 비해 훨씬 넓게 나타나고 있다.

본 공법을 적용한 현장은 다층토 구간이지만 터널 상부지반이 지하수위 아래의 점성이 큰 풍화토가 우세하므로 일반 계측 데이터의 평균치 보다는 i/R (i : 터널변곡위치, R : 터널 반경) 값이 오히려 작게 나타날 가능성이 크다. 따라서 이러한 점을 고려할 때 본 공법을 적용한 경우 약 1.5~2.0배 정도의 지표침하 트라프폭의 증가를 예상할 수 있다. 일반적으로 국내 지하철의 경우 동일한 현장에서는 터널 주변의 차수 및 보강을 위한 그라우팅을 실시한 경우가 그라우팅을 실시하지 않은 경우에 비해 30% 정도의 침하 트라프폭의 증가를 보여주고 있는 것으로 보고³되고 있으므로 본 보강 공법을 적용한 경우에는 이와 유사한 경향을 나타낸다고 사료된다. 이러한 경향성은 본 공법이 터널 천단 부근에서는 터널 변위를 크게 구속 시키나 터널 측벽부에서는 터널내로의 지반손실을 상대적으로 크게 발생시키기

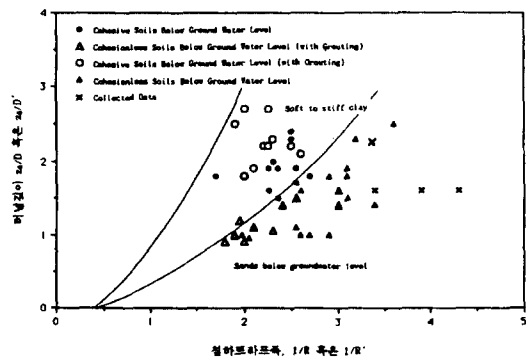


Fig. 15. The graph of Peck's ground settlement³⁾

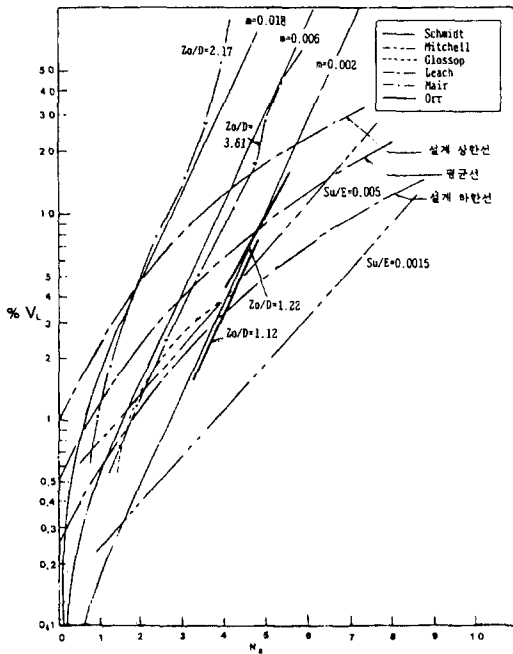


Fig. 16. Relation between stability ratio and ground loss³⁾

때문에 터널 중심선상의 지반침하는 크게 경감시키는 반면, 침하트래프는 보다 넓게 형성하는 것으로 추정된다.

또한, 본 연구에서는 UAM 공법을 적용한 경우, 실제 터널 막장에서 안정성이 어느 정도 증진되는가를 파악하기 위하여 안정비(stability ratio)^{4,5)}의 변화정도를 조사하였다. 일반적으로 안정비는 $N_s = \gamma Z_0 / S_u$ 로 나타낸다. 여기서 γ 는 지반의 단위중량, Z_0 는 터널길이, S_u 는 지반의 전단강도이다. 따라서 γZ_0 는 터널막장에 작용하는 수직응력을 나타내므로 본 보강 공법을 일본의 계측자료를 근거로 하여 적용한 경우는 하중경감 효과를 50% 고려하고, 지반의 전단강도는 강관을 통한 주입법 위가 직경 1 m 이내로 좁기 때문에 10% 정도의 증가효과만을 고려하면, $N_s \approx 0.45 N_s'$ 이 된다. 여기서 N_s' 은 UAM 공법을 시행하지 않은 경우의 터널의 안정비를 말한다. 결과적으로 터널 막장의 안정성이 2배 정도 증진되는 것으로 볼 수 있겠다.³⁾

여기서 안정비는 지반거동의 원인인 지반손실과 비례관계에 있고, 특히 도심지 터널에서는 설계시 변위조건을 주로 고려하기 때문에 지반손실 범위가 비교적 낮은 수준에 머문다는 점을 감안하면 Fig. 16으로부터 N_s 감소에 따른 지반손실 체적(% V_g) 감소는 1/4~1/2 (약 1/3) 정도 경감되는 것으로 볼 수 있다. 결과적으로

지반손실 체적과 터널 천단침하는 직선적인 비례관계에 있기 때문에 본 공법을 적용하는 경우 터널 내부의 천단침하량은 1/4~1/2 (평균 약 1/3) 정도 경감되게 된다. 이러한 해석결과와는 전술한 현장 계측 자료 분석결과와도 일치하고 있어 향후 본 공법을 적용하는 경우 터널 설계에 이들 결과를 반영할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 UAM 공법에 대한 현장적용 실험 및 수집된 계측 자료 결과분석으로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 본 공법이 적용된 현장에서의 지반탄성계수는 원지반과 비교했을 때 약 4배 이상 보강효과가 있는 것으로 나타난 바, 본 공법이 지반 보강 공법으로서의 역할을 충분히 발휘하고 있음을 확인하였다.

2) 본 연구 대상 터널 현장에서 계측을 수행한 결과, 본 공법을 적용할 경우 터널 천단부의 변위구속 효과가 매우 커서, 기존의 타 보강공법(chemical grouting, forepoling 방법) 적용시 보다 천단침하량에서 1/3 정도, 지표침하량에서는 1/2 정도의 경감효과를 얻을 수 있는 것으로 나타난 바, 본 공법이 연약한 지반의 침하 억제에 탁월한 역할을 할 것으로 기대된다.

3) 터널 막장의 거동 영역과 붕괴각도를 측정 분석해 본 결과, 막장의 안정에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 암반의 절리각도와 방향인 것으로 나타났다. 그러나 국내 터널 현장조건상 막장 암반의 절리각도와 방향을 정확하게 사전 결정하기가 용이치 않기 때문에 풍화도, 풍화암 구간에서는 극한 상태의 막장거동영역을 고려, 강관의 중첩 길이를 결정하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.

4) 본 공법이 적용된 현장의 수집계측자료를 분석해 본 결과, 본 공법이 터널 측면부에서 보다는 터널천단부 구속효과가 크며, 터널 측면부에서 터널 내측으로의 지반손실이 상대적으로 크기 때문에 터널 중심선상의 지반침하는 경감되지만, 결국 침하트래프 폭은 넓어지게 되는 경향성을 보여 주었기 때문에 침하트래프 폭에 민감한 구조물이나 건물 존재할 때는 주의를 요하는 시공이 필요할 것으로 판단된다.

5) 막장의 안정성을 판단할 수 있는 안정비도 본 공법이 적용된 경우 약 2배 이상 증진되는 바, 이러한 결과들을 본 공법이 적용되는 현장의 터널 설계에 충분히 반영

할 수 있도록 해야 할 필요성이 있는 것으로 사료된다.

6. 향후 연구 분야

본 공법이 적용된 구간이 풍화암 구간이고, 한정된 지역에서 계속이 수행되었기 때문에 추후에 현장 적용을 위해서는 다양한 지반조건에서의 효과확인 연구가 필요하며, 실용화 단계에서 본 공법의 설계변수 선정 문제 및 설계 가이드 제시 등에 대한 추가적인 연구가 앞으로 뒤따라 주어야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 배규진 외 5인(1994), "강관 삽입식 다단 그라우팅 병용공법의 개발 연구," '94 대한토목학회 추계학술발표회 논문집, pp. 763-766.
- 배규진 외 5인(1994), "Umbrella 공법에 의한 터널 천단부 보강시 주변지반의 변위 연구," 한국지반공학회 '94 추계학술발표회 논문집, pp. 217-224.
- (주) 지오텍 엔지니어링(1994), "강관보강형 다단 그라우팅 공법의 개발," pp. 104-124.
- 진병익, 천병식(1984), "물유리계 주입재를 주로 한 지반강도증대," 대한토목공학회논문집, 제 4권 제 4호, pp. 89-99.
- 한국건설기술연구원(1985), "지반침하방지공법에 관한 연구," 전기연 85-W-2, pp. 308.
- 한국건설기술연구원(1986), "지하굴착보조공법의 설계와 시공에 관한 연구," 전기연 86-GE-2, pp. 200-220.
- 한국건설기술연구원(1993), "지하생활 공간개발 요소 기술 연구; 지반굴착 기술분야(I)," pp. 3-60~3-66, 3-135~3-140.
- 高根昇(1982), "土木特殊工法リス1: 推進工法," 森北出版株式會社, pp. 107-204.
- 中村一産, 河田博之(1981), "推進工法の計畵設計の諸問題," 最近の推進工法②, 總合土木研究所, pp. 1210.
- 山木 念, Pagliacci, F.(1992), "Aosta谷の道路トンネル群にみる新工法," トンネル地下, 1, 第 23卷, 1號, pp. 21-28.
- Barisone, G., Pigorini, B., Pelizza, S.(1982), "Umbrella Arch Method for Tunnelling in Difficult Conditions-Analysis of Italian Cases," Proc. 4th Cong. Inter. Assoc. of Engineering Geology, New Delhi, Vol. 4, pp. 15-27.
- Bruce, D. A., Gallavresi, F.(1988), "Special Tunnelling Methods for Settlement Control: Infillaggi and premilling," Proc. 2nd Inter. Conf. on Case histories in Geotechnical Engng. 6, 1121-1126.
- Eisenstein, Z., Ezzeldine, O.(1992), "The Effect of Tunnelling Technology on Ground Control," Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 7, No. 3, pp. 273-279.
- Fathalla, E. N.(1992), "Construction Monitoring of Urban Tunnels and Subway Stations," Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 7, No. 4, pp. 425-439.
- Pelia, D.(1994), "A theoretical study of Reinforcement Influence on the stability of tunnel face," Geotechnical and Geological Engineering, 1994, 9, Vol. 12, No. 3, pp. 145-168.
- Pelizza, S., Pelia, D.(1993), "Soil and Rock Reinforcements in Tunnelling," Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 8, No. 3, pp. 357-372.
- Societa Italiana Gallerie(1991), "Tunnelling in Italy: 1990," Tunnelling and Underground Space Technology. Vol. 6, No. 3, pp. 299-316.
- Yunfeng, L.(1990), "Pipe Roof Supporting Method in Karst and Fill Section of Nanling Tunnel," Proc. of the Inter. Cong. The ITA Annual Meeting, pp. 235-241.